

■ 論 文 ■

GPS probe 및 루프 검지기 자료의 융합을 통한 통행시간추정 알고리즘 개발

A development of travel time estimation algorithm fusing
GPS probe and loop detector

정 연 식

(아주대학교 교통연구센터 연구원)

최 기 주

(아주대학교 교통공학전공 부교수)

목 차

- | | |
|--|-------------------------------------|
| I. 서론 | 4. 검지기 통행시간과 GPS probe 통행시
간의 퓨전 |
| II. 배경 이론 | IV. 자료의 구축 및 알고리즘 평가 |
| 1. Voting technique | 1. 자료의 구축 |
| 2. 퍼지회귀모형(Fuzzy regression model) | 2. 자료의 정리 |
| 3. 데이터 퓨전 | 3. 자료의 분석 |
| III. 통행 시간 추정을 위한 데이터 퓨전 알고
리즘 개발 | 4. 알고리즘 평가 |
| 1. 알고리즘의 개요 | V. 결론 및 향후 과제 |
| 2. GPS probe vehicle을 이용한 통행시
간 추정 알고리즘 | 1. 결론 |
| 3. 검지기를 이용한 통행시간추정 알고리즘 | 2. 향후 과제 |
| | 참고문헌 |

요 약

증가하는 실시간 교통정보의 욕구를 충족시키기 위해 현재 개발 중인 혹은 개발된 교통정보 수집체계의 종류와 수는 점차 증가하고 있다. 이렇게 각기 다른 수집체계로부터 수집된 원시자료를 이용하여 교통 정보화하는 과정에는 2가지 문제점이 발생하게 된다. 첫째, 각 분석주기 동안 단일 수집체계를 통해 수집된 많은 원시자료는 분석 주기를 대표할 단일 교통정보 추정을 위한 통합과정이 요구된다. 둘째, 각 분석주기동안 특정 링크에 다양한 수집체계를 통해 교통정보가 수집된 경우 링크별 단일 정보 추정을 위해 정보의 통합과정이 요구된다. 즉, 동일한 시공간적 환경하에 각기 다른 규모와 정확도를 지닌 다양한 수집체계로부터 수집된 자료/정보를 효과적으로 처리하기 위한 기술이 요구된다. 본 논문에서는 이러한 환경에서 수집된 통행시간 자료/정보에 대하여 링크별 최적 통행시간 정보 추정을 위한 퓨전 알고리즘의 제시를 그 목적으로 한다. 또한, 개발된 알고리즘을 평가하기 위해 현장 실험을 통해 구축된 자료를 적용하였으며, 그 결과 단순히 산술평균된 통행시간보다 알고리즘을 통한 통행시간이 실측 시간과의 비교에서 우수하게 나타났다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 향후 교통정보 수집환경이 체계적으로 구축된 후 보다 광범위하게 사용되어질 수 있을 것이다.

1. 서론

교통 혼잡은 수요가 공급을 넘어서 평형을 이루지 못하여 발생하는 것이다. 이러한 교통 혼잡을 해결하기 위한 방안으로는 시설물의 공급, 교통 수요관리, 기존 시설 이용의 극대화, 새로운 기술의 적용을 들 수 있다. 이중 신기술의 적용으로 대표되는 것이 ITS(지능형 교통체계: Intelligent Transport Systems)이다.

ITS는 혼잡의 완화, 안전성의 제고, 교통으로 야기되는 환경문제의 해결과 같은 목표 아래 기존의 교통체계에 첨단 컴퓨터, 통신, 실시간 자료 처리 기술 등을 접목시킨 새로운 시도이다. ITS에는 5가지 세부분야가 있지만 특히 ATIS는 적절한 통행 정보를 도로의 이용자에게 제공함으로써 O-D(Origin-Destination)간을 통행하는 통행자의 통행시간을 최소화하기 위한 것이다. 통행시간의 최소화는 우선 도로의 이용자에게 양질의 교통정보를 제공하는 것으로 시작되며, 이를 위해서는 다양한 교통정보 수집체계로부터 충분한 자료의 수집이 요구된다. 현재 운영중인 혹은 시범중인 검지체계를 크게 고정식 검지체계와 이동식 검지체계로 나누어 볼 때, 고정식 검지체계의 대표적인 예로는 인덕티브 루프검지기(inductive loop detector), 자석검지기(magnetic detector), 적외선검지기(ultrared detector), 초음파검지기(ultrasonic detector), 이미지검지기(image detector) 등과 같은 온라인(on-line) 검지체계와 특정 지역에 파견된 고정 통신원을 들 수 있다. 그리고, 적은 수로 넓은 지역을 커버(cover)할 수 있다는 장점을 지닌 이동식 검지기로는 GPS probe vehicle, Loran-C, Beacon 등과 일반 통신원들의 체보 등을 들 수 있다.

양질의 교통정보 생성은 전술한 수집체계 뿐 아니라 분석/가공, 전달 체계 또한 중요하다. 다양한 수집체계로부터 수집한 원시자료는 이용자가 쉽게 인식할 수 있는 형태의 정보로 가공하게 되는데 이때 자료의 분석시 다음과 같은 문제점이 발생한다.

첫째, 교통정보는 실시간으로 수집된 원시자료에 대하여 설정된 정보의 분석주기(혹은 갱신주기) 동안 누적된 자료의 통합이 필요하다. 일반적으로 실시간 교통정보의 분석주기는 5분에서 15분 사이가 바람직한 것으로 보고된 바(Holdener, 1996) 이때 분석 주기동안 동일한 수집체계를 통해서 수집된 원시자료는 계속 누적되게 된다. 특히 온라인으로 수

집되는 루프 검지기의 자료나 probe vehicle 자료는 수집체계의 특별한 문제가 없는 한 수집 주기 동안 수집되는 원시자료의 수는 시간과 비례하게 된다. 이러한 상황을 고려할 때, 각 수집체계별 분석주기를 대표하는 정보의 추출을 위한 자료의 통합과정이 요구된다.

둘째, 정보의 분석주기 동안 동일 링크(link)에 대하여 다양한 수집체계를 통해 정보가 수집된 경우 정보의 통합이 필요하다. 즉, 특정 구간에 대하여 서로 다른 이동식 검지체계를 통한 정보의 수집과 고정식 검지체계가 설치된 구간에 대하여 이동식 검지체계의 정보 수집으로 인한 다중정보의 수집 현상이 발생하게 되며, 검지 체계의 종류 및 운영이 증가할수록 다중정보의 수집 기회는 증가하게 된다(특정 검지체계가 기타 다른 검지체계보다 언제나 우수한 신뢰도를 제공하지는 않을 것이기 때문). 이러한 경우 수집자료에 대한 지속적인 통합으로 보다 신뢰성 높은 정보의 추정이 요구된다.

본 논문은 이러한 맥락에서 동일한 시공간적 환경하에 각기 다른 규모와 정확도를 가지고 있는 다양한 수집체계로부터 수집된 자료를 효과적으로 통합하기 위한 방법으로 "데이터 퓨전(data fusion)" 기법을 적용하여 보다 신뢰성 있는 교통정보를 추정하기 위한 알고리즘의 제시를 그 목적으로 한다. 이러한 목적을 구현하기 위해(실제 상황을 최대한 반영하는 의미에서) 수원시 간선도로상에서 자료를 조사하고 이를 토대로 통행시간을 추정, 융합하여 실제 통행시간과의 비교를 통해 개발되어진 알고리즘을 평가하였다.

본 논문의 공간적 자료조사 구간으로 간선도로(수원시 소재 원천로 구간)를 선정하였고, 분석 주기동안 교통정보의 참 값을 도출하기 위해 모든 차량의 링크 통행시간을 측정하였다. 약 1Km구간에 4개의 링크에 제한을 두어 실험을 실시하였고, 시간적으로는 약 2시간 동안에 수집된 자료를 이용하여 알고리즘을 평가하였다. 자료의 수집을 위해서 6대의 GPS probe 차량과 8개의 Numetrics사 Hi-star NC-90 검지기가 사용되었다.

한편, 본 연구는 다음과 같은 가정하에 실시되었다. 교통정보의 분석주기를 5분으로 설정하였기 때문에 5분 동안 수집된 모든 자료는 시간적으로 동등한 자격을 부여하여 분석하였으며, 5분간 수집된 교통정

보는 주기적으로 갱신(update)¹⁾되며 그 패턴은 주기적으로 유사할 것으로 가정하였다. 즉, 통행패턴이 시간대별, 요일별, 계절별 존재하는 것처럼 5분 단위로 갱신된 교통정보는 주기적으로 유사한 패턴을 보일 것이다. 본 연구에서는 시간대별, 요일별, 월별 패턴을 모두 고려하여 1주일 전에 조사된 동일 시간대의 실측 통행시간은 유고상황이 없을 경우 1주일 후의 통행시간 패턴과 유사할 것이라는 가정하에 퓨전 기법을 적용하였다. 또한, 평가의 기준으로 사용된 링크별 5분 실측 통행시간 자료는 각 링크를 통행한 모든 차량의 평균통행시간이 사용되었다.²⁾

논문의 구성은 알고리즘 개발에 적용된 제반 기법에 대해 II장에서 간략히 검토한 후, III장에서는 알고리즘 개발, IV장에서는 자료의 구축 및 알고리즘의 평가를 각각 논하게 된다.

II. 배경 이론

1. Voting technique

Voting technique은 메타분석(meta-analysis)³⁾ 용어로 가중치를 부여하는 기법중의 하나라고 설명할 수 있다. 가중 평균은 자료의 조합을 위해 전통적으로 사용되었던 방법으로 분석 자료에 대하여 분산이 커지면 이들 자료에 대해서는 낮은 가중치를 부여하게 된다.

다음과 같이 일반적으로 가중평균을 구하는 식을 생각해 보자.

$$\pi_w = \frac{\sum_{k=1}^l w_k \phi_k(x)}{\sum_{k=1}^l w_k} \quad (1)$$

통행 시간의 평균을 나타내는 변수 y 에 대하여 n 개의 추정치를 고려해 보자. 각 추정치 $\phi_k(\cdot)$ 는 $x = (x_i)_{i=1, \dots, n}$ 에서 $\phi_k(x)$ 값을 나타낸다. 결과 값 π_w 는 가중 평균이며, 여기에서 w_k 는 각 추정치 ϕ_k

의 신뢰값을 나타내는 가중치이다.

지금까지 가중치 w_k 를 구하기 위해 많은 추정 기법들이 사용되어 왔으며, 이들 기법은 합리성 정도를 평가할 수 있는 정당화된 이론이 없다는 제약으로 대부분은 경험을 기반으로 이루어졌다. 본 연구에서는 많은 자료 수집체계 $k=1, \dots, l$ (하나의 모집단에서 추출한 다양한 규모의 샘플)이 존재할 경우 각각에 대하여 하나의 추정치 $(\phi_k)_{k=1, \dots, l}$ 를 제공할 수 있도록 다음과 같이 수식을 전개한다.

각 추정치는 다른 규모의 자료에서 추정되지만, 동일한 규모의 y 를 추정한 것으로 가정한다. 퓨전을 실시하기 이전에 일반적으로 이러한 가설의 가능성과 y 의 추정치 사이의 상호 일치성을 체크하게 된다. 일단 이러한 과정이 분석 이전의 단계에서 끝나게 되면, l 추정치 $(\phi_k)_{k=1, \dots, l}$ 는 가중 기법을 이용하여 통합하는데 이때 이러한 방법을 메타분석 용어로는 "voting"이라 불린다(Olkin, 1992).

식(1)에서 가중평균(π_w)의 분산과 가중치와의 관계를 알아보기 위해 같은 식을 고려해 보자.

$$\begin{aligned} var(\pi_w) &= var\left(\frac{\sum_{k=1}^l w_k \phi_k}{\sum_{k=1}^l w_k}\right) \\ &= \sum \theta_k^2 var(\phi_k) + 2 \sum_r \sum_{r \neq s} \theta_r \theta_s cov(\phi_r, \phi_s) \quad (2) \end{aligned}$$

여기에서, $\theta_k = \frac{w_k}{\sum_{k=1}^l w_k}$ 이고, "cov"는 공분산을

나타낸다. 만일 추정 모형이 통계적으로 독립이라면, 위 식에서 두 번째 식은 0이 된다. 그래서, π_w 의 분산에 대한 식은 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$var(\pi_w) = \sum \theta_k^2 var(\phi_k) \quad (3)$$

여기에서, 만일 추정치의 분산 $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_l^2$ 을 알고

1) 본 논문에서는 주기적으로 갱신되는 링크별 교통 정보를 historical link profile이라 지칭함.
 2) 설정된 교통정보의 분석주기 동안에는 적신호에 영향을 받지 않고 링크를 통행한 차량과 그렇지 못한 차량의 통행시간이 혼재하게 된다. 때문에 단위 분석주기 동안 통행시간의 참 값은 각 링크를 통행한 모든 차량의 평균통행시간으로 설정하였다.
 3) Meta-analysis is ... the statistical analysis of a large collection of analysis results from individual studies for the purpose of integrating the findings(Glass, 1976). 즉, 서로 독립적인 연구의 결과를 조합하는 기법을 말한다. (<http://www.mscc.dal.ca/~barrowma/ma/definition.html> 참고)

있다면, 최적 가중치(optimal weight)는 k 번째 수집체계로부터 추정된 추정치의 분산에 비례하게 된다. 이러한 의미에서 다음과 같은 간단한 가중치 부여 방안을 설정할 수 있다.

$$w_k = \frac{d_k}{\sigma_k^2} \tag{4}$$

여기에서, d_k 는 k 번째 수집체계에서 수집된 자료의 자유도이다.

즉, 각 수집 자료의 분산이 커지면 가중치를 적게 부여하고 수집된 자료의 수가 많아지면 가중치를 크게 부여하는 간단한 아이디어이며, 이때, 가중평균의 분산은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{var}(\pi_w) = \frac{1}{\sum_{k=1}^l w_k} \tag{5}$$

위식을 정리하여 간단한 y 의 최적 voting 추정치를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \pi_w = \frac{\sum w_k \phi_k(x)}{\sum w_k} \\ w_k = \frac{d_k}{\sigma_k^2} \end{cases} \tag{6}$$

만일 분산을 모르는 경우에는 w_k 의 적절한 추정치를 대체하여 사용한다. 만일 s_k 가 자유도 d_k 와 k 번째 샘플 사이즈 n_k 를 기반으로 한 σ_k 의 불편 추정치(unbiased estimator)라면, 이때 식(6)의 w_k 를 대체하여 사용될 최우추정치(MLE)는 다음과 같이 표현할 수 있다(Faouzi, 1997).

$$w_k = \frac{n_k}{\frac{d_k}{d_k+1} [s_k^2] + \frac{1}{d_k+1} [n_k(y_k - \pi_w)^2]} \tag{7}$$

그리고 π_w 의 분산은 다음과 같이 근사된다.

$$\frac{1}{\sum (w_k - \frac{2}{d_k+1})} \tag{8}$$

2. 퍼지 회귀 모형(Fuzzy regression model)

1) 일반 선형회귀 기법의 개요

전통적인 회귀 모형은 독립변수와 종속변수사이의 관계를 추정한다. 즉, 주어진 자료 (x_j, y_j) 에 대하여 다음과 같은 회귀모형을 가정할 수 있다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_n x_{in} + \varepsilon_j \quad j = 1, \dots, p \tag{9}$$

여기에서, β_j 는 회귀 계수이고, ε_j 는 j 번째 자료에 대한 관측 에러이다. 이 식은 다음과 같이 행렬 형식으로 간단하게 표현할 수 있다.

$$y = X\beta + \varepsilon \tag{10}$$

여기에서, $y = (y_1, \dots, y_p)^t$, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_p)^t$, $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n)^t$, X 는 $p \times (n+1)$ 행렬로 다음과 같이 표현된다.

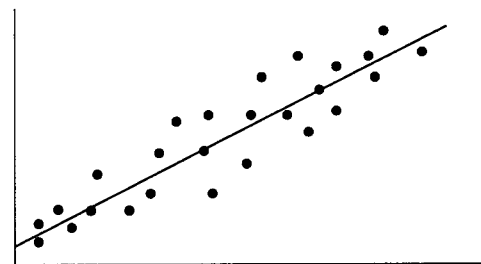
$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{p1} & \dots & x_{pn} \end{bmatrix}$$

전통적인 회귀 기법에서는 관측치와 추정치 사이의 편차는 관측오차에 기인하는 것으로 가정한다. 그래서, 이들 관측오차를 최소화하기 위해 다음과 같은 방식을 사용한다.

$$\text{Min}_{\beta} \varepsilon^t \varepsilon = (y - X\beta)^t (y - X\beta) \tag{11}$$

위 식을 풀면, 최적의 회귀계수 β^* 는 다음과 같이 구해진다.

$$\beta^* = (X^t X)^{-1} X^t y \tag{12}$$



(그림 1) 최소자승 모형(일반 회귀모형)

이렇게 구해진 최적 회귀모형을 그래프로 나타내면 <그림 1>과 같다.

2) 퍼지선형회귀 기법

일반 회귀와 달리 퍼지 회귀에서는 관측치와 추정치 사이의 편차는 모형내 파라미터의 퍼지성(fuzziness) 혹은 가능성(possibility)에 기인하는 것으로 가정한다. 그래서 이들 편차는 퍼지 파라미터를 이용하여 회귀 모형을 구축한다. 퍼지 회귀모형은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = A_0 + A_1x_1 + \dots + A_nx_n = AX \quad (13)$$

여기에서, $x = (1, x_1, \dots, x_n)'$ 는 입력 벡터이고, $A = (A_0, A_1, \dots, A_n)$ 은 퍼지회귀계수 벡터, Y 는 추정된 퍼지 결과값이다. 만일 A_i 가 대칭 퍼지수 (symmetric fuzzy number)라면, $A_i = (a_i, c_i)_L$ 로 나타내는 A_i 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mu_{A_i}(x) = L\left(\frac{x_i - a_i}{c_i}\right), \quad c_i > 0 \quad (14)$$

여기에서, a_i 는 중심, c_i 는 폭, $L(x)$ 는 퍼지수에 대한 함수유형을 나타낸다. 대칭 삼각 퍼지수 A_i 에 대하여, $L(x) = \max(0, 1 - |x|)$ 와 A_i 의 소속함수 (membership function)는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mu_{A_i}(x) = 1 - \left| \frac{x - a_i}{c_i} \right| \quad (15)$$

회귀 계수 A_i 가 퍼지수이기 때문에 추정된 결과 값 Y 또한 퍼지수가 된다. 즉, 식(13)은 다음과 같이 표현된다.

$$Y(x_j) = (a_0, c_0)_L + (a_1, c_1)_Lx_{j1} + \dots + (a_n, c_n)_Lx_{jn} \\ = (a'x_j, c'|x_j|)_L \quad (16)$$

위 식에서 $a'x_j$ 와 $c'|x_j|$ 는 퍼지 결과값 $Y(x_j)$ 의 중심과 폭을 나타낸다.

$$a'x_j = a_0 + a_1x_{j1} + \dots + a_nx_{jn} \quad (17)$$

$$c'|x_j| = c_0 + c_1|x_{j1}| + \dots + c_n|x_{jn}| \quad (18)$$

그래서, 식(16)의 소속함수는 다음과 같이 표현한다.

$$\mu_Y(y) = \begin{cases} 1 - \frac{|y - a'|x|}{c'|x|}, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0, y = 0 \\ 0, & x = 0, y \neq 0 \end{cases} \quad (19)$$

그리고, 만일 A_i 가 구간 계수로 고려된다면, A_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$A_i = (a_i, c_i)_L = \{u \mid a_i - c_i \leq u \leq a_i + c_i\} \quad i \\ = 0, 1, \dots, n \quad (20)$$

이 경우 식(13)은 구간 회귀 모형이라 부르며, 다음과 같이 표현한다.

$$Y(x_j) = (a'x_j, c'|x_j|) \quad (21)$$

2개의 퍼지수 $A_1 = (a_1, c_1)_L$ 와 $A_2 = (a_2, c_2)_L$ 를 고려할 때, 소속정도 $0 \leq h \leq 1$ 를 이용한 포함관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[A_1]_h \supseteq [A_2]_h \Leftrightarrow a_1 + |L^{-1}(h)|c_1 \geq a_2 + |L^{-1}(h)|c_2 \\ a_1 - |L^{-1}(h)|c_1 \geq a_2 - |L^{-1}(h)|c_2 \quad (22)$$

여기에서, $[A]_h = \{x \mid \mu_A(x) \geq h\}$ 이다. 식(22)를 이용하여 추정된 퍼지 결과 값 Y 의 h -level 집합은 관측된 크리스프(crisp) 집합을 포함시킬 수 있다.

$$y \in [Y]_h \Leftrightarrow a'x + |L^{-1}(h)|c'|x| \leq y \\ a'x - |L^{-1}(h)|c'|x| \leq y \quad (23)$$

대칭 삼각 퍼지수에 대하여 $|L^{-1}(h)|$ 는

$$|L^{-1}(h)| = 1 - h \quad (24)$$

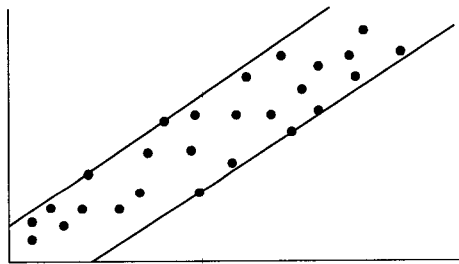
그래서, 식(23)에서 추정된 퍼지 결과 값 Y 의 h -level 집합은 다음의 구간에 속하게 된다.

$$[Y]_h = [a'x - (1 - h)c'|x|, a'x + (1 - h)c'|x|] \quad (25)$$

주어진 (x_j, y_j) 에 대하여 퍼지 회귀 분석은 최적 퍼지 회귀 계수 $A_i^* = (a_i, c_i)_L$, $(i = 0, 1, \dots, n)$ 를 결정하는 것이다. 이 문제는 다음과 같은 LP(Linear Programming)문제의 해를 구함으로써 해결된다.

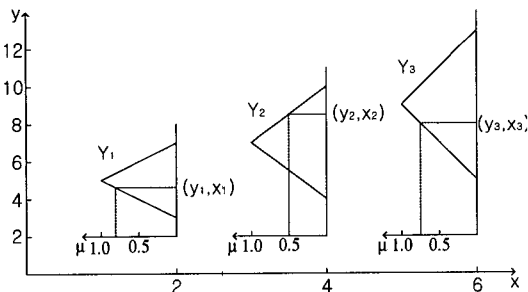
$$\begin{aligned} \min_{a, c} \quad & J = \sum_{j=1}^p c_j |x_j| \quad (26) \\ \text{s.t.} \quad & a^t x + (1-h)c^t |x| \geq y \\ & a^t x - (1-h)c^t |x| \leq y \\ & c_j \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 0, \dots, p \end{aligned}$$

이렇게 구한 퍼지 회귀식을 그래프로 표시하면 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 퍼지 회귀 모형(단, $h=0$)

또한 <그림 3>은 구축된 소속함수에 적용된 크리스프 자료를 나타낸다.

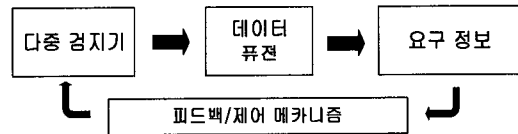


<그림 3> 소속함수에 적용된 크리스프 자료

3. 데이터 퓨전

1) 데이터 퓨전 기법의 개요

데이터 퓨전은 다양한 검지기(수집체계)로부터 수집한 자료들을 어떻게 통합할 것인가를 다루는 기술을 말한다(Hall, 1992). 즉, 각 검지기(수집체계)에 대한 물리적 이벤트(event), 활동(activity), 또는 상황(situation)에 관한 추론을 하기 위해 다양한 수집 자료들을 적절히 활용하고 이들의 영향도를 평가하여 최적의 결과값을 산출하는 것이다. <그림 4>는 데이터 퓨전의 일반적인 수행과정을 나타낸 것이며, 이러한 data fusion 기술은 초창기에는 전장 감시(battlefield surveillance), 전술적 상황평가(tactical situation assessment) 등의 목적으로 군(軍)에서 주로 적용되었으나, 근래에는 로봇공학(robotics), 자동생산(automated manufacturing), 원격탐사(remote sensing) 등의 일반 과학 및 공학 분야에도 널리 확산되어 적용되고 있다. 최근에는 데이터 퓨전이 군에서 적용되는 분야와 이론적 발전을 연구하는 일반 분야의 2개 분야로 나뉘어 발전되고 있다.



<그림 4> 데이터 퓨전의 일반적인 수행과정(TECH REACH Inc., 1996)

2) 데이터 퓨전 기법의 분류

데이터 퓨전의 연구는 적용 폭이 넓고 적용 기술이 다양하기 때문에 복잡하다. 그리고 근래의 데이터 퓨전 기술은 통계, 인공지능(Artificial Intelligence), 운영과학(Operations Research), 디지털 신호 처리(digital signal process), 의사결정(decision making) 분야의 수학적 기법과 경험적 기법이 얽혀있는 양상을 보이고 있다. 그래서, 일반 연구원이나, 엔지니어들이 특정 문제를 해결하기 위해 어떠한 기법을 적용시킬 것인가에 대해 많은 어려움을 겪는다.

일반적으로 데이터 퓨전은 기능적 모형에 따라 level 1부터 level 3⁴⁾까지 분류한다. Level 1은 수

4) Level 1 : Fused position and identity estimates
 Level 2 : Hostile or friendly military situation assessments
 Level 3 : Hostile force threat assessments

집된 자료에 대하여 수용여부 및 통합 기능을 수행하며, 그 결과를 이용하여 현재 상태를 평가하는 것이 level 2이다. 마지막으로 level 3은 주로 군사 분야에 적용되며 위험도 분석을 수행한다.

본 논문에서는 level 1에서 주로 사용되는 기법을 이용하여 교통관련 정보의 추정에 이용하게 될 것이다. 여기에서 level 1에 적용되는 기법에 대해 알아보면, level 1에 적용되는 데이터 퓨전 이론은 다음의 3가지로 분류한다(Hall, 1992).

- ① 보다 정확하게 물체의 위치와 속도를 추정하는 위한 기법(positional fusion)
- ② 물체를 확인하기 위해 여러 개의 센서로부터 자료를 통합하는 기법(identity fusion)
- ③ 1단계 과정을 보조하기 위해 필요한 부수적인 기법(ancillary support algorithms)

본 논문에 사용된 GPS 단말기⁵⁾는 이미 1차 가공된 자료를 전송하며, 본 논문의 주 목적은 수집된 자료의 통합 알고리즘 개발에 있으므로 "positional 퓨전" 기법보다는 "identity 퓨전" 기법을 이용하여 알고리즘을 개발하였다.

〈그림 5〉는 identity 퓨전 알고리즘을 세분화한 것이며, 여러 개의 센서로부터 자료를 통합하는 아이디어는 통계학이나 경제수학(econometrics) 등의 문헌에서는 추정의 일종인 "mixed estimation"이라는 용어로 사용되기도 한다(Judge et al., 1982).

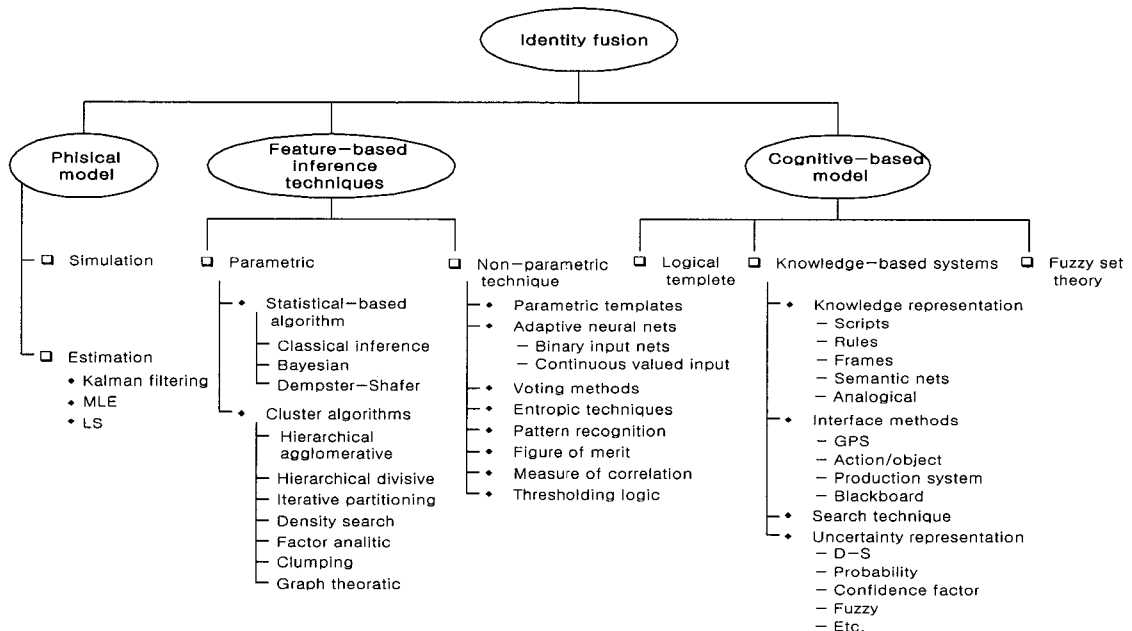
3) 데이터 퓨전의 기대효과

데이터 퓨전의 기대 효과는 정량적으로 정확한 수치를 계산할 수는 없지만 정성적인 측면으로 운영적 수행도 향상, 검지 공간의 확장, 신뢰도 향상, 추론의 애매성 감소, 검지율 향상 등의 효과가 있다(Hall, 1992).

일반적으로 단일 검지 체계로부터 수집된 자료를 통해 추론된 정보보다는 둘 이상의 검지 체계로부터 추론된 정보의 기대 효과가 더 크다. 그렇다면, 검지 체계의 수와 기대효과는 비례하는 것일까? 이 문제를 설명하기 위해 Nahie과 Pokoski(1980)는 다음의 4가지 항목으로 구분하여 설명하였다.

첫째, 정확하지 않은 검지 체계(추론 확률 0.5이하)로부터 수집한 자료를 조합할 때 데이터 퓨전의 장점이 현저하게 드러나는 것은 아니다.

둘째, 보다 정확한 검지 체계(추론 확률 0.95 이



〈그림 5〉 Identity 퓨전 알고리즘의 분류(Hall, 1992)

5) 본 연구에 사용된 인텔 GPS 단말기는 모두 Kalman filtering 기법을 이용하여 1차 가공된 자료를 제공하기 때문에 positional 퓨전이 적용된 것으로 가정한다.

상)로부터 수집된 자료를 조합할 때, 정확도가 현저하게 증가하지는 않는다.

셋째, 검지 체계의 수가 많이 존재할 때(예를 들면 8~10이상의 검지 체계), 검지기 수를 추가하더라도 추론의 정도가 현저하게 증가하는 것은 아니다. 그러나, 검지체계 수의 추가는 측정 가능한 분야의 수가 증가시키기 때문에 추론 능력에 중요한 영향을 미칠 수 있다.

넷째, 개개의 검지 체계가 적절한 검지 확률을 가지고 있을 때, 1~7개의 검지 체계가 가장 적절하다.

4) 교통정보 추정을 위한 데이터 퓨전의 활용 사례

교통 정보 추정을 위한 퓨전의 문제는 ITS 시스템 평가(Sumner, 1991), 동적 O/D추정 모형(Ben-Akiva & Morikawa, 1989), 유고 검지 알고리즘(Koppelman et al., 1994) 그리고 이산 선택 모형(Yai et al., 1989) 등에도 적용되었다. 또한, 최근에는 Cremer와 Schrieber(1996)가 이질적인 자료 수집체계를 통해 수집된 자료를 통해 교통 상황을 감시하는 연구를 하였다. 이 밖에 El Faouzi와 Lesort(1995)는 통행 시간 추정에 있어 각기 다른 2가지 수집체계(인덕티브 루프 검지기의 정보와 probe vehicle을 통해 수집한 통행시간 자료와 통행 특성 자료)로부터 자료를 혼합할 경우의 효과를 지적하였다. 그리고 약간은 다른 분야이지만 교통 상황과 차량의 공해 물질 방출과의 상관관계를 추정하기 위해 퓨전이 적용되기도

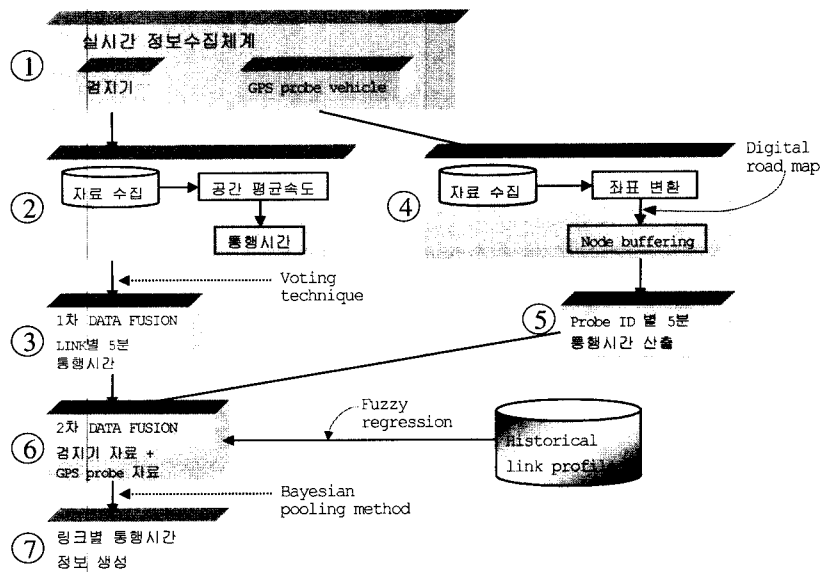
했다(Khoudour & Lesort, 1992).

국내에서는 도로교통안전협회에서 주관한 교통정보 서비스 센터(KORTIC)구축 시 다양한 수집체계로부터 링크 통행시간을 추정하기 위해 퓨전 기법을 적용한 사례가 있다(도로교통안전협회, 1997). 그러나 전문적인 적용사례에서는 대부분 로봇 공학이나 이미지 프로세싱을 위해 개발된 기법이 사용되었으나, 본 논문에서는 이러한 유형의 퓨전 기법은 다루지 않고 대신 많은 양의 다양한 추정치에 대한 퓨전을 가능케 하는 통계적 기법에 중점을 두어 적용할 것이다.

III. 통행 시간 추정을 위한 데이터 퓨전 알고리즘 개발

1. 알고리즘의 개요

퓨전을 위한 알고리즘은 75가지 이상 되는 것으로 연구되었으나, 본 연구에서는 가중평균기법, 퍼지회귀 기법, Bayesian 기법을 퓨전 알고리즘에 적용하였다. 특히 가중평균기법에 대한 가중치를 부여하기 위해 voting technique을 적용하였다. <그림 6>은 2가지 수집체계 자료를 이용한 통행시간 추정 과정을 나타낸 것이며, 각 단계별 수행과정을 간단히 소개하면 다음과 같다.



<그림 6> 링크별 통행시간 추정을 위한 퓨전 알고리즘

- ① 검지기와 GPS probe vehicle을 통해 실시간 교통정보를 수집한다.
- ② 각 링크를 2개의 구간으로 나누어 수집된 검지기 지점 속도자료를 이용하여 각 구간의 공간평균 속도를 추정한 후 이 자료를 이용하여 각 링크별 통행시간을 구한다.
- ③ 검지기 통행시간은 voting technique을 적용하여 검지기 5분 통행시간을 추정한다.
- ④ GPS 자료는 분석을 위해 좌표 변환 후 GIS에 표현하였으며, GPS의 오차와 수치지도의 오차를 감안하여 링크통행시간을 산출할 수 있는 절차를 수행하였다(노드의 buffer 설정).
- ⑤ 설정된 노드의 buffer를 기준으로 연속한 노드의 buffer에 속한 각GPS point의 최후 point간의 시간차이를 이용하여 링크 통행시간을 산출한다.
- ⑥ 링크별로 추정된 5분간 통행시간 정보가 2개 이상 존재할 경우 퍼지회귀기법을 이용하여 각 통행시간 정보의 소속정도를 구축한다.
- ⑦ 각 검지체계별 통행시간과 소속정도를 이용하여 Bayesian polling 기법으로 융합된 링크별 단일 통행시간을 구축한다.

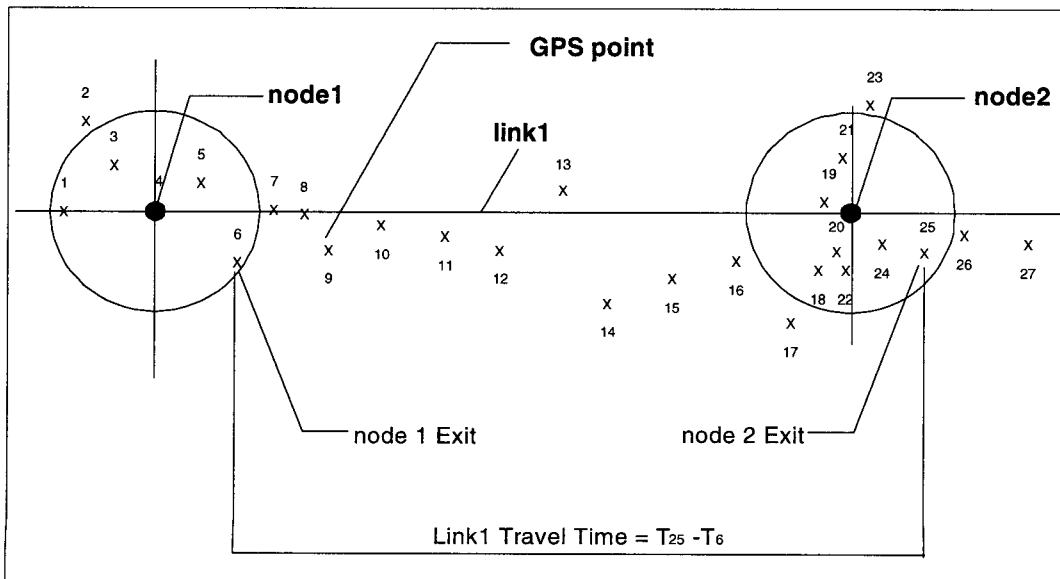
2. GPS probe vehicle을 이용한 통행시간 추정 알고리즘

1) GPS 자료의 좌표변환

일반적으로 GPS 자료를 이용하여 실시간으로 통행시간을 산정하기 위해서는 GIS와의 연계작업이 요구된다. 그러나, GPS 자료의 기준계와 우리나라의 측지기준계가 다르기 때문에 변환과정이 요구되며, 이러한 측지학적인 문제로는 GPS 기준원점의 설치문제와 지오이드(geoid) 기복의 사정 및 타원체간의 변환관계의 정립을 들 수 있다. 타원체간의 변환관계에 대한 문제는 GPS에서 채택된 WGS84와 우리나라의 기준인 Bessel 타원체간의 변환으로, GPS에서 얻어지는 측지 성과는 WGS84 타원체에 대한 것이므로 우리나라에서 사용하는 측지계로의 변환이 필요하다. 우리나라 측지계와 WGS84의 좌표변환을 위해 매개변수 좌표변환에 의하여 매개변수를 산출하고 이에 따른 좌표변환을 수행하여 Bessel 좌표계를 산출한다. 그리고 변환된 Bessel좌표계 자료를 국가 좌표계의 평면투영으로의 변환이 필요한데, 우리나라의 경우 TM좌표계를 사용하기 때문에 TM좌표로 변환하면 된다.

2) 통행시간의 추정

GPS차량을 통해 수집되는 자료는 노드나 링크의 정보와 관계없이 좌표 값과 시간만을 제공하기 때문에 이를 통행시간 추정에 이용하기 위해서는 두 노드간의 시간 차이로 간단하게 계산된다. 그러나 GPS로



〈그림 7〉 GPS 자료를 이용한 통행시간 추정

부터 제공된 지점 좌표 값이 어느 노드에 관련이 있는가에 대한 연계 작업이 필요하다. 즉, GPS 수신기는 오차가 내재되어 있는 자료를 수신하고, 수치지도 또한 오차가 내재되어 있기 때문에 이를 허용할 수 있는 범위를 설정하여 GPS좌표와 노드를 연계시켜주는 작업이 필요한 것이다. 간단한 알고리즘으로 GPS의 좌표가 특정 노드를 중심으로 설정된 원(circle)에 들어온 경우 GPS 차량은 노드에 존재하고, 그렇지 않은 경우 노드를 지나거나 도착하지 않은 것으로 판정한다(최기주, 신치현, 1998). 특정 노드를 중심으로 설정되는 원의 크기는 분석하는 링크의 길이, GPS 자료의 오차, 수치지도의 오차 등을 고려하여 설정하게 된다.

〈그림 7〉은 GPS 자료를 이용하여 통행시간을 추정하는 방법을 설명하기 위해 나타낸 것이다. 링크 1의 통행시간은 먼저 노드 1과 2에 가상으로 설정된 원에 포함된 GPS 좌표를 선정한다. 선정된 좌표 중에서 마지막 수신시간 자료를 각각 선정하여 두 자료의 시간 차이를 계산하면 이 값이 링크 1의 통행시간이 된다.

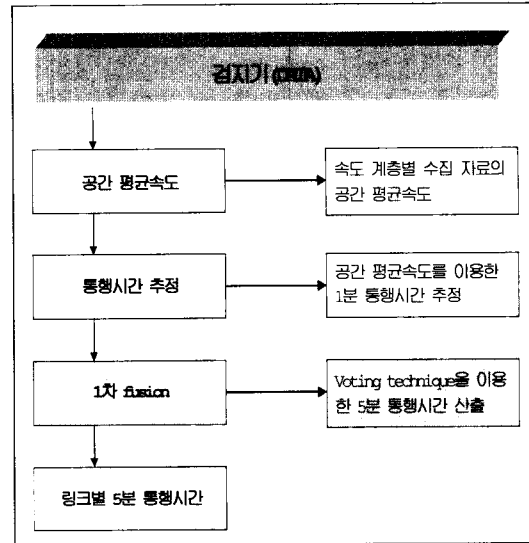
3. 검지기를 이용한 통행시간 추정 알고리즘

1) 루프 검지기를 이용한 통행시간 추정 알고리즘의 개요

루프 검지기를 이용한 통행 시간추정 알고리즘은 교통량, 점유율, 지점 속도 등의 검지 자료와 통행 시간과의 관계를 추정하는 모형식과 지체식을 이용하는 방식으로 나눌 수 있다. 검지 자료와 통행시간과의 관계를 추정한 모형식은 대부분 국지적으로 이루어지거나, 모의 실험 자료를 이용한 것이 대부분이며, 범용적으로 사용할 수 있는 추정식은 없다. 그리고 지체식을 이용한 통행시간 추정 방식은 과포화시에는 검지기 교통량을 적용할 수 없다는 단점이 있기 때문에 별도의 분석이 요구된다. 본 연구에서는 링크에 2개 이상의 검지기가 설치된 경우를 가정하여 검지기가 설치된 각 구간별로 수집된 검지기 자료를 이용하여 통행시간을 추정하였다. 〈그림 8〉는 검지기 자료를 이용한 통행시간 추정 알고리즘을 나타낸 것이다.

2) 공간 평균속도를 이용한 통행시간 산정

공간 평균속도를 이용하여 통행시간을 추정하기 위한 식은 다음과 같다.



〈그림 8〉 검지기 자료를 이용한 통행시간 추정 알고리즘

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{L_i \times 3.6}{v_i} \quad (27)$$

여기에서,

T : 통행시간(초)

L_i : 소구간 i 의 길이(m)

v_i : 소구간 i 검지기에서 수집된 공간평균속도 (Km/h)

식(27)에서 공간평균 속도 산정식은 다음과 같다.

$$v_s = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{v_j}} \quad (28)$$

여기에서,

v_s : 공간평균속도

v_j : 차량별 주행속도

n : 일정지점을 통과한 차량의 대수

4. 검지기 통행시간추정을 위한 1차 퓨전

검지기 자료에 대한 퓨전 기법의 적용은 5분간 검지기를 통해 수집된 자료가 누적되기 때문에 필요하다. 일반적으로 검지기 원시 자료는 교통관리 센터에서 현시별 혹은 주기별 자료를 출력하기 때문에

5분 동안 수집된 자료는 다양한 분포를 나타내게 된다. 즉, 5분 동안 검지기를 통해 검지된 교통량, 점유율, 지점속도 등이 지속적으로 출력하는 것이 아니고, 교통관리 센터에서 설정한 수집주기 마다 출력된다. 이렇게 5분간 출력된 자료는 적신호에 영향을 받은 자료도 포함되어 있고, 많은 교통량 자료를 포함하고 있는 자료와 그렇지 못한 자료 등 다양한 분포를 형성하고 있을 것이다. 본 연구에서는 보다 신뢰성 있는 통행시간 정보를 산출하기 위해 이러한 자료를 단순 산술평균 보다는 퓨전 기법을 적용하여 5분간 통행시간을 산출하고자 하였다. 본 연구에서는 전술한 voting technique을 적용하여 검지기 자료의 1차 퓨전을 실시하였다.

5. 검지기 통행시간과 GPS probe 통행시간의 퓨전

만일 루프 검지기가 설치된 링크에 GPS probe vehicle이 통행하여 2가지 수집체계로부터 통행시간 정보를 산출하였다면, 링크의 단일 정보 산출을 위한 정보의 통합과정이 요구된다. 본 연구에서는 퍼지회귀 기법을 적용하여 각 수집체계별 퓨전을 위한 신뢰도(소속정도)를 산출하였다.

각 검지체계별 산출된 소속정도는 링크별 단일 통행시간 추정을 위해 Bayesian 이론을 기반으로 한 평균의 pooling 방법을 퓨전에 적용하였다.

$$TT_a = \sum_{i=1}^n w_i T_{a_i} \quad (29)$$

여기에서 TT_a 는 링크 a 에 대한 통행 시간이며, T_{a_i} 는 단위 분석 주기 동안 i 번째 수집체계를 통해 수집된 링크 a 의 통행 시간이며, n 은 단위 분석 주기 동안 링크 a 에 통행시간 정보를 제공한 수집체계의 총 수이다. 그리고, w_i 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (30)$$

여기에서, λ_i 는 퍼지회귀를 통해 각 수집체계에 부여된 소속정도이다.

IV. 자료의 구축 및 알고리즘 평가

1. 자료의 구축

자료의 구축을 위한 실험은 현재 교통정보 수집체계가 본 연구의 가정대로 동시에 다양한 수집체계로부터 수집되는 구간이 거의 존재하지 않기 때문에 많은 제약이 따르게 된다. 특히, 본 연구에 사용될 GPS 수신기는 6대로 제한되었기 때문에 선정된 구간에 대하여 지속적으로 교통정보를 수집하기 위해 실험 구간의 양 끝 단에서 회차하여 다시 실험구간을 운행하는 방법을 적용하였다. 이러한 조건 때문에 실험 구간은 기본적으로 유턴(U-turn)이 가능한 지역으로 선정되며, 또한 GPS의 자료분석을 위해서는 GIS와의 연계가 필요하기 때문에 수치지도가 구축된 지역이 선정되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 조건을 만족하는 구간으로 수원시에 위치한 원천로(동수원 4거리~아주대 입구)를 대상구간으로 설정하였다. 원천로는 편도 4차선에 좌회전 포켓(pocket)과 버스 전용차로가 운행되고 있고, 대부분의 교차로에서는 유턴이 가능하기 때문에 공간적으로 적합하다. 또한, 수치지도가 구축된 도로이므로 GPS 자료 분석도 가능한 지역이다. 아래 <표 1>은 실험구간으로 선정된 링크를 나타낸다.

<표 1> 실험구간

링크	동수원 4거리 -> 아주대 입구			
	1	2	3	4
길이(m)	288	256	197	150

한편, historical link profile을 대체할 자료를 생성하기 위해 실험 1주일전(11월 21일) 동일 시간대인 11:00 ~ 13:00까지 링크별로 16mm 캡코더를 이용하여 historical link profile 용 실측 시간을 구축하였고, 1주일 후(11월 28일)에 동일한 방법으로 알고리즘의 평가용 실측 통행시간을 측정하였다. 실측 통행시간은 버스 전용차로를 제외한 3개의 차선에 대하여 이루어 졌으며, 각 링크별로 모든 차량에 대하여 스톱워치(stop watch)를 이용하여 측정하였다. 때문에 미미하지만 측정원의 측정 에러가 내재되어 있을 수 있다.

2. 자료의 정리

1) GPS 자료의 정리

다음의 <표 2>은 본 연구를 통해 수집된 GPS probe 자료의 일부를 나타낸 것이다. 표에 나타난 자료 이외에도 기타 다른 자료도 수신되지만, 본 연구의 목적에 필요한 자료만 출력할 수 있도록 단말기를 조작하였기 때문에 다음과 같은 자료만을 수집하게 된다.

<표 2> GPS probe 자료의 예

110038127026203716824021
110040127026203716824009
110042127026203716823001
110044127026203716822000
여기에서,
110044 : HHMMSS 수신시간
12702620 : 경도 (NMEA 형식 127도 02.620분)
3716822 : 위도 (NMEA 형식 37도 16.822분)
00 : 지점속도 (Km/h)

2) 검지기 자료의 정리

<표 3>은 Hi-star NC-90 검지기로부터 수집된 자료의 일부를 나타낸 것이다. 15가지의 속도 계층별로 교통량 수집이 가능하며, 수집된 시간과 노면의 온도, 습도 등의 자료를 제공한다.

3)실측 자료의 정리

<표 4>는 캠코더를 이용하여 촬영한 결과를 스톱

<표 3> Hi-star 90 검지기 자료의 예

Temp(℃)	Wx	Date	Time	Volume	Speed(kph)					
					< - 5	6 -10	11-14	...	64-68	72- >
9	0	11-28-98	11:00	21	0	0	0	...	0	0
10	0	11-28-98	11:01	22	0	0	0	...	3	2
10	0	11-28-98	11:02	6	0	0	0	...	0	0
10	0	11-28-98	11:03	24	0	0	1	...	0	0
10	0	11-28-98	11:04	14	0	0	0	...	0	0
10	0	11-28-98	11:05	8	0	0	0	...	0	1
10	0	11-28-98	11:06	18	0	0	0	...	2	1
10	0	11-28-98	11:07	19	0	0	0	...	0	1
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴

※ 표에서 Wx는 노면의 습한정도를 나타냄

위치를 이용하여 모든 차량의 통행시간을 측정하는 것이다. Historical link profile로 이용하기 위해 1주일 전 동일한 시간대에 측정된 자료는 대체로 유사한 패턴을 나타내었다.

3. 자료의 분석

1) GPS probe 자료를 이용한 통행시간 추정

수집된 GPS probe vehicle 자료는 분석용 수치 지도와의 좌표체계를 일치시키기 위해 좌표 체계를 변환하게 된다. 본 연구에 적용된 수치지도는 자동차 부품연구원(KATECH)에서 CNS(Car Navigation System)용으로 1995년에 제작한 지도를 적용하였다. 좌표의 변환을 위해 본 연구에서는 Arc/Info를 이용하였다. Arc/Info의 "project" 명령어는 다양한 형태의 좌표변환을 가능하게 해준다.

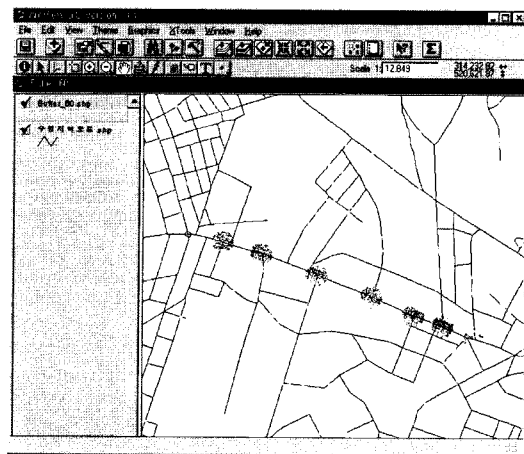
변환된 자료를 ArcView 프로그램에 띄우게 되면 GPS 자료가 북서쪽으로 상당히 편향되어있다. 이 오차의 대부분은 타원체인 지구를 평면으로 투영하면서 발생한 에러와, 수치지도 구축시 발생한 에러일 것이며, 그리고 인텍 GPS장비의 에러도 목인할 수는 없을 것이다. 이러한 에러는 GPS 자료에 대하여 일률적으로 발생되기 때문에 도로의 교차지점을 참조하여 일률적으로 이동시키면 된다.

GPS probe vehicle 자료를 이용하여 링크 통행 시간을 산정하기 위해서는 GPS point가 노드를 통과했는지 여부를 판정하는 규칙이 필요하다. 본 연구에는 DGPS를 사용하지 않고 일반 GPS를 이용하여 에러가 약 70m정도까지 발생하였다. 분석을 위해 노드를

〈표 4〉 실측된 통행시간 자료

Time period	Link 1		Link 2		Link 3		Link 4	
	11/21/98	11/28/98	11/21/98	11/28/98	11/21/98	11/28/98	11/21/98	11/28/98
11:00 ~ 11:04	74.47	39.87	25.96	19.76	14.69	21.39	21.92	16.42
11:05 ~ 11:09	47.15	31.25	17.58	23.98	20.38	22.08	26.27	21.67
11:10 ~ 11:14	50.58	36.78	25.70	19.20	22.01	21.31	21.76	20.16
11:15 ~ 11:19	29.17	32.57	25.16	18.96	16.40	15.70	9.12	16.32
11:20 ~ 11:24	31.39	34.79	19.72	21.82	22.87	17.07	18.29	17.69
11:25 ~ 11:19	56.26	27.36	29.97	20.07	11.18	16.38	26.23	16.43
11:30 ~ 11:34	44.72	28.22	21.55	21.05	9.01	19.41	26.75	19.45
11:35 ~ 11:39	41.91	42.21	18.15	21.65	22.64	23.34	23.44	26.04
11:40 ~ 11:44	61.98	52.58	35.97	37.67	21.54	16.04	26.28	19.88
11:45 ~ 11:49	76.37	88.07	30.67	23.07	21.58	17.28	16.96	16.36
11:50 ~ 11:54	26.31	33.31	22.75	21.05	19.74	28.04	36.42	29.12
11:55 ~ 11:59	46.74	55.14	23.48	23.08	32.35	21.45	18.53	22.93
12:00 ~ 12:04	68.64	58.74	21.45	20.05	12.57	14.47	15.10	12.50
12:05 ~ 12:09	63.73	66.53	45.20	60.80	37.71	25.71	11.58	14.68
12:10 ~ 12:14	54.34	57.74	41.80	50.50	62.68	30.18	22.63	31.23
12:15 ~ 12:19	23.93	33.63	23.73	17.73	74.33	56.13	61.95	61.05
12:20 ~ 12:24	52.26	43.36	26.28	18.68	40.88	35.48	51.54	42.04
12:25 ~ 12:29	29.15	28.75	13.45	18.75	57.36	41.46	66.01	59.71
12:30 ~ 12:34	57.25	48.45	27.75	27.65	72.91	46.51	30.46	40.36
12:35 ~ 12:39	28.22	31.52	12.63	21.23	38.93	36.33	66.18	69.48
12:40 ~ 12:44	73.21	87.21	36.36	28.46	53.33	39.53	55.09	61.29
12:45 ~ 12:49	26.24	32.14	36.04	32.54	79.51	43.71	64.18	61.28
12:50 ~ 12:54	19.88	29.18	38.06	30.16	48.18	37.38	43.63	43.83
12:55 ~ 12:59	37.40	29.70	21.68	23.48	19.92	26.32	25.59	27.79

중심으로 한 원(buffer)의 반경은 30m에서 100미터 까지 다양하게 적용해 보았다. 반경을 크게 설정하여 많은 GPS자료를 분석에 적용하게 되면 자료의 수는 많아지지만 정보의 질이 감소하게 되고, 또한 링크의 길이가 짧을 경우 buffer간에 중첩현상도 발생할 수 있다. 그러나, buffer를 너무 좁게 설정하면 분석된 정보의 질은 높아지지만 분석용 자료의 수가 작아지는 결과를 초래한다. 본 연구에서는 node를 중심으로 설정된 buffer는 60m가 적절한 것으로 판정되었다⁶⁾. 〈그림 9〉는 설정된 buffer에 속한 GPS probe vehicle 자료를 ArcView에 나타낸 것이며, 〈표 5〉는 설정된 buffer를 이용하여 통행시간을 산정한 결과를 나타낸 것이다.



〈그림 9〉 60m buffer에 속한 GPS probe vehicle 자료

6) 버퍼 사이즈 결정은 우선 실험 차량이 6대로 제한적이었기 때문에 가능한 한 자료의 유효 표본수를 크게 설정해야 했다. 그리고, GPS 자료의 오차는 70m이내에서 발생했기 때문에 그 이상으로 설정할 필요는 없었다. 마지막으로 5분 통행시간 추정결과와의 관계 등을 모두 고려하여 60m로 설정되었다.

〈표 5〉 GPS probe vehicle 자료를 이용한 통행시간의 예 (단위:초)

Time period	Link 1						Link 2					
	GPS 1	GPS 2	GPS 3	GPS 4	GPS 5	GPS 6	GPS 1	GPS 2	GPS 3	GPS 4	GPS 5	GPS 6
12:15 ~ 12:19	13	46	46	-	16	38	20	22	19	20	18	-
12:20 ~ 12:24	-	-	-	22	14	-	-	-	-	20	-	20
12:25 ~ 12:29	46	16	17	-	-	68	20	16	15	-	14	22
12:30 ~ 12:34	20	-	-	48	-	-	16	-	-	18	18	16
12:35 ~ 12:39	38	95	101	48	-	-	-	-	19	24	-	-
12:40 ~ 12:44	-	-	-	52	14	-	18	14	-	24	14	22
12:45 ~ 12:49	20	18	16	98	80	-	20	143	33	34	-	20
12:50 ~ 12:54	94	-	-	-	-	-	18	-	-	-	30	-
12:55 ~ 12:59	80	88	15	-	42	16	-	-	18	-	20	18

〈표 6〉 검지기 자료를 이용한 통행시간 추정 결과

Time period	Link 1			Link 2			Link 3			Link 4		
	fusion	mean	actual	fusion	mean	actual	fusion	mean	actual	fusion	mean	actual
11:00 ~ 11:04	30.58	27.48	39.87	20.57	20.33	19.76	20.66	20.39	21.39	14.16	13.94	16.42
11:05 ~ 11:09	23.68	22.90	31.25	21.61	21.07	23.98	21.16	20.59	22.08	20.76	19.16	21.67
11:10 ~ 11:14	26.28	23.17	36.78	21.77	21.41	19.20	21.07	20.08	21.31	18.09	17.66	20.16
11:15 ~ 11:19	26.05	23.42	32.57	20.42	19.59	18.96	15.68	15.55	15.70	13.56	13.18	16.32
11:20 ~ 11:24	27.32	25.33	34.79	20.38	20.22	21.82	13.89	13.82	17.07	14.24	13.55	17.69
11:25 ~ 11:29	23.05	21.03	27.36	20.23	20.04	20.07	13.90	13.66	16.38	15.08	14.76	16.43
11:30 ~ 11:34	25.59	23.71	28.22	18.96	18.85	21.05	16.42	16.33	19.41	16.41	16.25	19.45
11:35 ~ 11:39	34.55	26.51	42.21	24.48	23.28	21.65	17.79	17.45	23.34	14.50	14.28	26.04
11:40 ~ 11:44	56.46	51.61	52.58	22.34	22.20	37.67	15.81	15.15	16.04	16.04	15.13	19.88
11:45 ~ 11:49	49.80	33.42	88.07	22.49	22.01	23.07	18.30	17.74	17.28	16.53	15.74	16.36
11:50 ~ 11:54	27.17	24.44	33.31	21.17	21.06	21.05	18.86	17.86	28.04	16.20	15.05	29.12
11:55 ~ 11:59	28.55	23.51	55.14	20.76	20.49	23.08	17.95	18.02	21.45	18.18	16.34	22.93
12:00 ~ 12:04	29.43	28.04	58.74	20.39	19.85	20.05	14.96	14.18	14.47	15.15	13.49	12.50
12:05 ~ 12:09	60.05	32.12	66.53	31.09	29.11	60.80	23.61	23.29	25.71	18.40	17.44	14.68
12:10 ~ 12:14	28.12	27.26	57.74	27.49	25.94	50.50	33.23	27.09	30.18	28.91	24.48	31.23
12:15 ~ 12:19	25.56	25.12	33.63	24.83	23.06	17.73	33.34	32.68	56.13	34.89	33.15	61.05
12:20 ~ 12:24	29.91	24.68	43.36	19.41	19.14	18.68	27.50	26.98	35.48	32.87	27.89	42.04
12:25 ~ 12:29	25.79	24.14	28.75	19.47	19.12	18.75	31.52	29.17	41.46	27.35	24.67	59.71
12:30 ~ 12:34	25.02	23.02	48.45	23.48	23.02	27.65	39.06	35.80	46.51	42.85	38.68	40.36
12:35 ~ 12:39	22.17	21.28	31.52	20.36	19.86	21.23	32.31	30.89	36.33	39.01	36.29	69.48
12:40 ~ 12:44	26.03	23.71	87.21	24.06	23.84	28.46	33.45	31.59	39.53	32.70	28.43	61.29
12:45 ~ 12:49	25.84	25.40	32.14	29.95	23.52	32.54	39.45	39.36	43.71	34.59	32.29	61.28
12:50 ~ 12:54	26.41	23.78	29.18	22.97	21.14	30.16	35.82	33.12	37.38	31.40	30.17	43.83
12:55 ~ 12:59	23.36	20.82	29.70	17.94	17.63	23.48	15.93	15.08	26.32	23.98	10.39	27.79

2) 검지기 자료를 이용한 통행시간 추정

공간평균 속도는 mid-block과 하류부 검지기로부터 수집된 검지기 자료에 대하여 각각 구하게 된다. Mid-block 검지기는 링크의 중간부분에 하류부 검지기는 교차로의 정지선 부분에 설치하여, 두 구간의 길이는 동일한 것으로 가정하여 분석하였다. 식(27)을 이용하여 추정된 검지기 1분 통행시간은 5분 동안 5번 추정된다. 본 연구에서는 5분 동안의 최적 통행시간을 산출하기 위해 voting technique을 이용하여 퓨전을 실시하였다.

3) 단일정보 추정을 위한 통행시간의 퓨전

단일정보 추정을 위한 통행시간의 퓨전은 단위 분석주기동안 서로 다른 통행시간 정보가 수집된 경우

에 이루어진다. 만일 특정링크에 수집된 통행시간 정보가 유일하다면 단일 정보 추정을 위한 퓨전과정은 생략된다. <표 7>은 각 수집체계별 2시간 동안 수집된 링크 1의 통행시간 정보를 나타낸 것이다. 예를 들어 11:00~11:04 시간대에 퓨전 과정은 생략된다.

퓨전을 위해 퍼지회귀모형은 각 시간대 별로 구축되며, LP 문제의 해를 구함으로써 최적회귀계수를 구하게 된다. 본 연구에서는 LP 문제를 해결하기 위해 LP 패키지인 "LINDO"를 적용하였다. 최적 회귀계수는 소속함수의 구축에 적용되며, 각 수집체계로부터 추정된 통행시간 정보는 소속함수를 통해 신뢰값(소속정도)이 부여된다. 11:05~11:09 시간대를 예로 들어 설명하면 <표 8>과 같다.

<표 7> 검지체계별 추정된 링크 1의 통행시간 정보

Time period	Link 1						
	detector	GPS 1	GPS 2	GPS 3	GPS 4	GPS 5	GPS 6
11:00 ~ 11:04	30.58	-	-	-	-	-	-
11:05 ~ 11:09	23.68	-	-	-	-	40	-
11:10 ~ 11:14	26.28	-	-	98	40	-	-
11:15 ~ 11:19	26.05	-	-	-	14	14	-
11:20 ~ 11:24	27.32	-	-	38	-	-	-
11:25 ~ 11:29	23.05	-	-	-	96	100	-
11:30 ~ 11:34	25.59	-	-	100	-	-	-
11:35 ~ 11:39	34.55	-	-	-	14	36	-
11:40 ~ 11:44	56.46	-	-	112	110	106	-
11:45 ~ 11:49	49.80	-	-	48	-	-	-
11:50 ~ 11:54	27.17	-	-	18	48	48	-
11:55 ~ 11:59	28.55	-	-	-	-	-	-
12:00 ~ 12:04	29.43	-	-	-	-	-	-
12:05 ~ 12:09	60.05	-	-	-	-	-	-
12:10 ~ 12:14	28.12	-	-	-	14	-	-
12:15 ~ 12:19	25.56	16	46	47	-	16	38
12:20 ~ 12:24	29.91	-	-	-	20	14	-
12:25 ~ 12:29	25.79	48	16	12	-	-	50
12:30 ~ 12:34	25.02	18	-	-	48	16	-
12:35 ~ 12:39	22.17	40	95	101	46	-	-
12:40 ~ 12:44	26.03	-	-	-	50	12	-
12:45 ~ 12:49	25.84	20	19	15	98	78	-
12:50 ~ 12:54	26.41	94	-	-	-	-	-
12:55 ~ 12:59	23.36	80	83	17	-	44	16

〈표 8〉 소속함수 구축의 예

다음과 같이 퍼지 회귀식을 구축한다.⁷⁾
 $Y = A_0 + A_1 X_1$
 여기서, X_1 = 링크의 길이
 Y = historical link profile
 위 식에서 최적 회귀계수를 구하기 위해 다음과 같은 LP 모형을 구축한다.
 $Min J = 4c_0 + 890c_1$
 Subject to
 $a_0 + 287a_1 + c_0 + 287c_1 \geq 47.15$
 $a_0 + 256a_1 + c_0 + 256c_1 \geq 17.58$
 $a_0 + 197a_1 + c_0 + 197c_1 \geq 20.38$
 $a_0 + 150a_1 + c_0 + 150c_1 \geq 26.27$
 $a_0 + 287a_1 - c_0 - 287c_1 \leq 47.15$
 $a_0 + 256a_1 - c_0 - 256c_1 \leq 17.58$
 $a_0 + 197a_1 - c_0 - 197c_1 \leq 20.38$
 $a_0 + 150a_1 - c_0 - 150c_1 \leq 26.27$
 $c_0 \geq 0$
 $c_1 \geq 0$

위 LP 모델에 대하여 "LINDO"를 적용하면 다음의 해를 구하게 된다.

$J = 43.18817, c_0 = 0.000000,$
 $c_1 = 0.048526, a_0 = 3.408685, a_1 = 0.103883$

그래서, 11:05 ~ 11:09 시간대의 소속함수는

$$\mu_y(y) = 1 - \left| \frac{y - [1 \ 287]^t [3.408685 \ 0.103883]}{43.18817} \right|$$

여기에서, x = 링크의 길이
 y = 수집된 통행시간 정보

〈표 8〉의 과정을 모든 시간대별 적용하여 소속함수를 구축하여 수집된 각 통행시간의 소속정도를 구할 수 있다. 그러나, 구축된 소속함수는 historical link profile을 적용했기 때문에 실시간으로 수집된 통행시간 정보가 특이치를 나타낼 경우에는 소속정도가 음의 값을 나타내 퍼지이론에 위배된다. 때문에 소속정도가 음의 값을 나타내는 통행시간은 퍼진 과정에서 제외시켰다.

각 시간대별 통행시간의 소속정도는 Bayesian pooling 기법을 이용하여 링크별 단일 통행시간 정보를 추정하게 된다. 예를 들어, 11:05~11:09 시간대 링크 1에 대하여 단일 통행시간을 구하면 다음과 같다.

$$\mu_y(detector_tt)$$

$$= 1 - \left| \frac{23.68 - [1 \ 287]^t [3.408685 \ 0.103883]}{43.18817} \right|$$

$$= 0.779$$

$$\mu_y(probe_tt)$$

$$= 1 - \left| \frac{40 - [1 \ 287]^t [3.408685 \ 0.103883]}{43.18817} \right|$$

$$= 0.843$$

$$TT_1 = \sum_{i=1}^2 w_i T_i,$$

$$= \frac{0.779 \times 23.68 + 0.843 \times 40}{0.843 + 0.779}$$

$$\approx 32.16$$

4. 알고리즘 평가

1) 산술평균과의 비교

일반적인 퍼진 기법은 난해하기 때문에 퍼진의 필요성에 대한 사항을 무시하는 경우가 종종 있다. 그러나 퍼진이란 전술한 바와 같이 자료의 통합 기법을 다루는 것이기 때문에 일반 산술 평균 또한 여기에 해당할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 가장 간단한 통합기법이라 판단되는 산술 평균과 본 연구에서 개발한 알고리즘의 결과를 평가하기로 했다.

산술평균은 수집된 모든 정보에 대하여 동일하게 처리하기 때문에 GPS probe vehicle이 주행과 관계없는 자료를 수신할 경우에는 에러가 커지게 된다. 좌회전 포켓의 대기행렬이 길어져 1차로를 주행하던 GPS probe vehicle이 멈춘 경우, 도로 주변의 주차장 혹은 버스 정류장에서의 방해로 인한 GPS probe vehicle의 서행 등이 그 대표적인 예라 할 수 있다. 그러나, 퍼지회귀모형을 통한 소속함수에서는 이러한 특수한 상황에 대해서는 낮은 소속정도를 부여하기 때문에 높은 통합된 정보의 신뢰도가 높아진다.

한편, 본 연구에서는 유고상황이 발생하지 않은 경우에 대해서만 고려했기 때문에 유고가 발생한 경우와 수집체계의 특수한 자료의 구분은 향후 연구과제로 남긴다.

2) 알고리즘의 평가

개발된 알고리즘의 평가를 위해 일반적으로 예측 모형의 정확성을 측정하는데 주로 사용되는 절대비율오차평균(mean absolute percentage error:MAPE)을 사용하였다. MAPE는 다음과 같은 식으로 정의된다.

7) 퍼지회귀식에서 링크길이 이외의 신호시간, 차선수 등의 변수도 설정하여 분석하였음. 참고로 이들 변수중에서 링크길이 이외의 다른 변수는 큰 영향을 주지 못하거나 영향력이 없는 것으로 나타남.

〈표 9〉 통행시간 추정 결과

Time period	Link 1			Link 2			Link 3			Link 4		
	fusion	mean	actual	fusion	mean	actual	fusion	mean	actual	fusion	mean	actual
11:00 ~ 11:04	30.58	30.58	39.87	20.57	20.57	19.76	20.66	20.66	21.39	14.16	14.16	16.42
11:05 ~ 11:09	32.16	31.84	31.25	19.90	19.80	23.98	21.16	21.16	22.08	20.76	20.76	21.67
11:10 ~ 11:14	35.43	54.76	36.78	19.66	18.89	19.20	20.99	19.27	21.31	15.53	15.36	20.16
11:15 ~ 11:19	21.30	18.02	32.57	16.89	15.47	18.96	15.68	15.68	15.70	13.56	13.56	16.32
11:20 ~ 11:24	29.50	32.66	34.79	19.33	19.19	21.82	13.05	48.47	17.07	13.46	13.06	17.69
11:25 ~ 11:29	26.27	73.02	27.36	20.23	20.23	20.07	13.90	13.90	16.38	15.08	15.08	16.43
11:30 ~ 11:34	25.59	62.80	28.22	15.85	15.74	21.05	14.16	14.10	19.41	11.30	11.10	19.45
11:35 ~ 11:39	30.50	28.18	42.21	19.57	18.83	21.65	21.03	41.93	23.34	12.28	12.17	26.04
11:40 ~ 11:44	56.46	96.11	52.58	21.22	21.17	37.67	14.03	13.90	16.04	14.13	14.02	19.88
11:45 ~ 11:49	48.91	48.90	88.07	20.79	20.62	23.07	16.72	16.58	17.28	22.69	25.63	16.36
11:50 ~ 11:54	31.37	35.29	33.31	18.25	18.04	21.05	17.03	16.95	28.04	16.20	74.07	29.12
11:55 ~ 11:59	28.55	28.55	55.14	20.76	20.76	23.08	17.95	17.95	21.45	18.18	18.18	22.93
12:00 ~ 12:04	29.43	29.43	58.74	20.39	20.39	20.05	14.96	14.96	14.47	15.15	15.15	12.50
12:05 ~ 12:09	60.05	60.05	66.53	31.09	31.09	60.80	23.61	23.61	25.71	18.40	18.40	14.68
12:10 ~ 12:14	23.44	21.06	57.74	27.49	27.49	50.50	33.23	33.23	30.18	28.91	28.91	31.23
12:15 ~ 12:19	33.57	31.43	33.63	20.78	20.64	17.73	60.60	79.89	56.13	41.36	39.98	61.05
12:20 ~ 12:24	22.61	21.30	43.36	20.51	20.47	18.68	23.40	59.83	35.48	28.82	28.29	42.04
12:25 ~ 12:29	31.64	30.36	28.75	17.55	17.41	18.75	47.49	67.75	41.46	36.53	38.39	59.71
12:30 ~ 12:34	29.22	26.75	48.45	21.55	42.30	27.65	63.24	83.26	46.51	57.30	71.77	40.36
12:35 ~ 12:39	51.70	60.83	31.52	16.86	22.45	21.23	40.93	67.08	36.33	53.68	104.34	69.48
12:40 ~ 12:44	30.39	29.34	87.21	19.69	19.34	28.46	38.28	55.08	39.53	44.75	82.28	61.29
12:45 ~ 12:49	44.13	42.64	32.14	32.18	48.79	32.54	55.05	125.36	43.71	66.56	79.20	61.28
12:50 ~ 12:54	26.41	60.21	29.18	27.11	26.24	30.16	39.65	39.16	37.38	31.91	85.73	43.83
12:55 ~ 12:59	24.68	43.89	29.70	17.99	17.99	23.48	14.29	49.98	26.32	24.51	24.74	27.79

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - f_i}{x_i} \right|}{n} \quad (31)$$

여기에서,

x_i : 관측값

f_i : 추정값

식(31)을 이용하여 개발된 알고리즘과 산술평균 결과자료에 적용하면 〈표 10〉와 같다. 표에서 나타난 바와 같이 개발된 알고리즘의 결과값이 산술평균의 MAPE값보다 우수함을 알 수 있다. 또한, GPS probe vehicle을 통해 산출된 통행시간이 크게 산출된 경우 알고리즘의 효과는 더욱 우수하

게 나타난다. 이 경우는 대부분 GPS probe vehicle이 좌회전 포켓에 발생한 대기행렬의 영향으로 통행시간이 커지거나, 버스의 정차로 인해 통행시간이 커진 경우이다. 이 경우 다른 차선의 소통상황과는 무관하게 통행시간이 커졌기 때문에 일반 산술평균 경우 실측 통행시간과의 에러가 커지게 된 것이다.

〈표 10〉 알고리즘 평가

구분	링크	MAPE			
		링크 1	링크 2	링크 3	링크 4
퓨전 알고리즘		26.515	16.483	15.166	25.546
산술 평균		50.251	19.909	44.883	37.724

V. 결론 및 향후 과제

1. 결론

본 논문은 다분히 미래 지향적인 사고로 출발한 논문으로 향후 교통정보 수집체계가 증가하여 동일 구간에 서로 다른 수집체제로부터 수집된 교통정보를 이용하여 보다 신뢰성있는 통행시간을 추정하기 위해 데이터 퓨전 기법을 도입하였다. 데이터 퓨전은 다양한 수집체제로부터 수집된 교통 상황 정보 중 가장 유용한 정보를 추출하는 효율적 방법으로 ITS의 초기 단계와 발전된 단계에서 모두 필요한 방법이라 여겨진다.

본 논문에서는 voting technique, 퍼지회귀, Bayesian pooling 기법을 이용하여 알고리즘을 개발하였으며, 알고리즘의 평가를 위해서는 일반 산술평균을 통해 산출된 통행시간과 비교를 하였다. 그 결과 소통상황이 원활한 경우에는 데이터 퓨전 알고리즘의 효과는 미미하였지만, 소통 상황이 원활하지 못한 경우와 도로의 특수한 상황에는 그 효과가 우수하게 나타났다. 특히, GPS probe vehicle이 좌회전 포켓에서 발생한 대기행렬에 영향을 받은 경우, 버스의 정차로 인해 영향을 받는 경우 통행시간이 높게 나타났지만 이러한 정보는 데이터 퓨전을 통해 낮은 통행시간으로 추정되었다.

결론적으로 실시간 교통정보의 욕구가 증가하면서 교통정보의 수집체제는 증가하게 될 것이며, 따라서 교통정보의 퓨전 기회도 증가하게 될 것이다. 본 연구의 결과에 나타난 것처럼 다양한 수집체제로 수집된 교통정보의 통합을 위해 단순 산술평균을 적용하는 것보다는 데이터 퓨전 기법을 적용하는 것이 보다 신뢰도가 높아짐을 알 수 있다. 또한, 데이터 퓨전 이론은 기존의 항공 우주, 로봇 공학, 군사 분야 이외의 교통정보 가공 및 활용 분야에 중요한 요소로 자리잡을 것으로 판단된다.

2. 향후 과제

데이터 퓨전은 이론적 배경에서 살펴본 바와 같이 약 75개 정도의 기법이 있는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 3가지 기법만을 적용하여 통행시간 추정에 적용하였으나 기타 다른 기법을 적용한 퓨전 알고리즘의 개발이 요구된다. 그리고, 본 연구는 다분히 미래 지향적인 개념을 담고 있기 때문에 현 단계에서 유사한 상황을 연출하기가 어렵다는 제약으로 특정

지역, 2가지 수집체제만을 고려하여 알고리즘을 분석하였으나 기타 다른 지역이나, 다른 수집체제를 적용한 알고리즘의 평가가 요구되며, 도로의 모든 소통 상황에 대하여 특정 퓨전 알고리즘이 항상 우수하지는 않을 것이기 때문에 소통상황의 LOS(Level of Service)를 고려한 알고리즘의 개발이 요구된다. 또한 논문의 주 목적이 개별 검지체제로부터 수집된 자료를 이용하여 통행시간을 추정하는 알고리즘의 개발보다는 추정된 정보의 융합에 초점을 두었기 때문에 개별 검지체제로부터의 통행시간 추정알고리즘 부분을 보완하는 것이 요구된다.

마지막으로 본 연구에 적용된 검지기와 GPS 장비는 비교적 상태가 양호한 상태이며, 특히, GPS probe vehicle은 통행시간 정보 수집을 위해서만 운행하였기 때문에 수집체제의 고장이나 운행이외의 다른 상황을 고려한 퓨전 알고리즘의 개발이 요구된다.

참고문헌

1. Andrezej Tarko and Nagui M. Roupail, "Data Fusion for ADVANCE Release 1.5 Data Fusion", ADVANCE Working Paper Series # 33, February, 1994.
2. Andrezej Tarko and Nagui M. Roupail, "Intelligent Traffic Data Processing for ITS Applications", Journal of Transportation Engineering, pp.298~307, July/August, 1997.
3. "Applications of GPS for surveying and other positioning needs in departments of transportation", NCHRP Synthesis 258.
4. Bruce Griesenbeck, Ken Gebert, and Jeremy Fitch, "Travel time and delay data collection using GPS and GIS", 1998.
5. B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, "Global Positioning System Theory and Practice", Springer-Verlag Wien New York, 1994.
6. Cesar A. Quiroga and Darcy Bullock, "Travel time studies with global positioning and geographic information systems: an integrated methodology", Transportation research part C, Vol 6, No 1/2, pp.101~127, February/

- April, 1998.
7. David L. Hall, "Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion", Artech House, 1992.
 8. Douglas J. Holdener, Shawn M. Turner, "Probe vehicle sample sizes for real-time information: The Houston experience", Proceedings of the 1996 annual meeting of ITS America, Vol 2, 1996.
 9. Edward Waltz and James Llinas, "Multisensor Data Fusion", Artech House, 1990.
 10. George G. Judge, Tsoung-Chao Lee, "The theory and practice of econometrics", Wiley, 1982.
 11. Hamdy A. Taha, "Operations research an introduction", Macmillan, 1987.
 12. Hideo Tanaka, HaeKwan Lee, "Fuzzy Regression Combining Central Tendency and Possibilistic Properties", Fuzzy-IEEE, pp.63~68, 1997.
 13. Hideo Tanaka, H. Ishibuchi, S. Yoshikawa, "Exponential possibility regression analysis", Fuzzy Sets and Systems 69, pp.305~318, 1995.
 14. Hideo Tanaka, Satoru Uejima, Kiyoji Asai, "Linear regression Analysis with Fuzzy Model", IEEE trans. on systems, man, and cybernetics, vol 12, No 6, pp.903~907, 1982.
 15. "Introduction to Multisensor Data Fusion: Multimedia Software", TECH REACH Inc. 1996.
 16. Jean ORSELLY, Yves DURAND-RAUCHER, "Assessment of existing methods of travel times acquisition and measurement", Proceedings of the 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems, Yokohama, Japan, pp.100~105, 1995.
 17. Laurence W. Carstensen, Jr., "GPS and GIS: Enhanced accuracy in map matching through effective filtering of autonomous GPS points", Cartography and Geographic Information Systems, Vol 25, No 1, pp.51~62, 1998.
 18. Lawrence A. Klein, "Sensor and data fusion concepts and applications", SPIE press, 1993.
 19. N. E. El Faouzi, "Heterogeneous data source fusion for impedance indicators", IFAC Transportation Systems, Chania, Greece, 1997.
 20. N. E. El Faouzi & J. B. Lesort, "Travel time estimation on urban networks from traffic data and on-board trip characteristics", Proceedings of the 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems, Yokohama, Japan, pp.88~93, 1995.
 21. Olkin I., "Meta-analysis: Methodes for combining independent studies", Statistical Science, Vol 7, No 2, pp.226~236, May 1992.
 22. Robert L. French, "Land vehicle navigation and tracking", American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp.275~301, 1995.
 23. R. Zito, G. D'este & M. A. P. Taylor, "Global positioning systems in the time domain: How useful a tool for intelligent vehicle-highway system?", Transportation Research part C, Vol 3, No 4, pp.193~209, 1995.
 24. Stanislaw Berka, Xin Tian & Andrew Tarko, "Data Fusion Algorithm for ADVANCE Release 2.0", ADVANCE Working Paper Series # 48, May, 1995.
 25. Sumner, R., "Data Fusion in Pathfinder and TravTek", Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings, p.253, 71~75, 1991.
 26. T. Terano, K. Asai, and M. Sugeno, "Fuzzy systems theory and its application", Academic Press, 1992.
 27. William R. McShane, Roger P. Roess, "Traffic Engineering", Prentice Hall, 1990.
 28. 김병천 역, "통계학을 위한 행렬대수학", 자유아카데미, 1993. 3.
 29. "교통분석 모형 최종보고서", 도로교통안전협회, 기아정보시스템, 1997. 11.
 30. 원제무, "도시교통론", 전영사, 1996.
 31. "첨단교통체계 연구기획보고서", 국토개발연구원, 1996. 3.

32. 최기주, 신치현, "GPS 와 GIS를 이용한 링크
통행 시간 예측기법", 대한교통학회지, 제 16권,
제 2호, pp.197~207, 1998. 6.
33. 최기주, 정연식, "링크 통행시간 추정을 위한 데이
터 퓨전 알고리즘의 개발", 대한교통학회지, 제 16
권, 제 2호, pp.177~195, 1998. 6.